

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ МОНОМЕТИЛАНИЛИНА В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ

Д. Ю. Муромцев<sup>1</sup>, В. Н. Назаров<sup>2</sup>✉,  
Б. С. Дмитриевский<sup>2</sup>, Р. В. Воронков<sup>2</sup>, Д. Г. Дмитриев<sup>2</sup>

*Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
«Информационные процессы и управление», ipu\_tstu@mail.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** математическая модель; материальный баланс; монометиланилин; насадочная колонна; нейронные сети; процесс ректификации; система управления; энергетический баланс.

**Аннотация:** Представлена математическая модель ректификации монометиланилина (ММА) в насадочной колонне непрерывного действия. При формировании математической модели использованы физико-химические и термодинамические закономерности процесса ректификации. Представлена математическая модель процессов в колонне, кубе и дефлегматоре. Математическая модель построена для системы управления технологическим процессом очистки MMA на основе цифровых средств автоматизации с использованием нейронных сетей для регулирования концентраций воды, анилина, MMA при возмущениях в виде изменения состава поступающей на разделение смеси.

---

### Введение

Монометиланилин (**ММА**) используется в качестве присадки, которая повышает детонационную стойкость бензина, то есть существенную характеристику бензина, по которой определяется его использование в разного рода двигателях внутреннего сгорания. Несмотря на большое количество теоретических и практических работ, посвященных получению MMA, задача повышения эффективности процесса очистки MMA и в настоящее время остается актуальной.

Производство MMA состоит из следующих основных стадий: нагрев и испарение исходной смеси; синтез MMA; охлаждение полученного катализата MMA; очистка MMA. Процесс очистки MMA является узким местом в технологической цепочке, так как представляет собой сложный и энергоемкий процесс, происходящий в насадочной ректификационной колонне непрерывного действия. Особенностью данного процесса является то, что разделяемые вещества анилин, MMA, диметиланилин (**ДМА**) имеют близкие температуры кипения.

### Формирование математической модели процесса ректификации

Методы математического моделирования [1 – 11] позволяют не только исследовать технологический процесс, но и найти пути усовершенствования систем управления. Современное состояние исследований в области моделирования и управления показывает, что построение современной автоматизированной системы управления, невозможно без адекватной математической модели технологического процесса, входящей в ее состав [12 – 17].

В работе [18] приведена математическая модель процесса очистки MMA, состоящая из уравнений, описывающих энергетические процессы в кубе (испарение смеси) и дефлегматоре (конденсация дистиллята), представляющих энергетические и физико-химические процессы в самой ректификационной колонне, учитывающие взаимное влияние компонентов разделяемой смеси.

Катализат MMA подают в точку питания, в куб колонны – пар, в дефлегматор – оборотную воду. В верхней части отбирают анилиновую фракцию, в средней части – MMA, а из куба колонны – ДМА.

При выводе уравнений математической модели колонны приняты следующие допущения [4, 8]:

- модель колонны – ячеичная;
- полное перемешивание жидкости и полное вытеснение пара на элементарном участке;
- теплота смешения потоков пара и жидкости равна нулю;
- пар насыщенный, жидкость имеет температуру кипения;
- отсутствует обратное перемешивание в жидкой и паровой фазах.

При выводе уравнений математической модели процессов, протекающих в кубе, приняты допущения:

- масса и теплоемкость теплоносителя (греющий пар) постоянны;
- пар насыщенный;
- в кубе происходит идеальное перемешивание в объеме;
- тепло, отдаваемое теплоносителем, полностью расходуется на нагрев смеси за исключением 20 %, идущих на теплопотери.

При выводе уравнений математической модели процессов, протекающих в дефлегматоре, приняты допущения:

- масса и теплоемкость хладагента постоянны.

Математическая модель является довольно сложной и громоздкой для использования ее при расчетах в режиме реального времени. Ее можно использовать для проведения имитационных исследований процесса очистки MMA в ректификационной колонне, которая является сложным объектом управления, характеризующимся большим числом взаимосвязанных выходных технологических координат. Поэтому к системе управления процессом очистки MMA предъявляются повышенные требования. Она должна быть реализована на современных цифровых средствах автоматизации, позволяющих с высокой скоростью и точностью реагировать на возмущающие воздействия и реализовывать алгоритмы управления, отличающиеся от стандартных промышленных алгоритмов применением принципов адаптации на основе искусственного интеллекта с использованием математической модели объекта. Алгоритмы управления должны обладать гибкостью, способностью к обучению. Нейронные сети из-за своей способности обучаться на основе соотношения «вход – выход» пригодны для решения данной задачи, однако в этом случае возрастает количество вычислений.

Предлагаемая модель упрощается за счет сокращения размерности системы уравнений. Такая математическая модель, с уменьшенным вычислительным временем расчета, предназначена для более качественного управления процессом ректификации MMA на основе нейронной сети.

### **Математическая модель колонны**

С учетом принятого допущения, уравнения материального баланса в жидкой фазе примут вид:

- выше точки питания:

$$\frac{dc_{\text{ж}i}^j}{d\tau} = \frac{L^1 c_{\text{ж}i}^{j+1} - L^1 c_{\text{ж}i}^j + V c_{\text{п}i}^{j-1} - V c_{\text{п}i}^j}{m}, \quad c_{\text{ж}i}^j(0) = c_{\text{ж}i}^{j0}, \quad i = \overline{1, 3}; \quad (1)$$

– в точке питания:

$$\frac{dc_{\text{ж}i}^j}{d\tau} = \frac{L^1 c_{\text{ж}i}^{j+1} - L^2 c_{\text{ж}i}^j + V c_{\text{п}i}^{j-1} - V c_{\text{п}i}^j + G_F c_{\text{ж}iF}}{m}, \quad c_{\text{ж}i}^j(0) = c_{\text{ж}i}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (2)$$

– ниже точки питания, но выше отбора MMA:

$$\frac{dc_{\text{ж}i}^j}{d\tau} = \frac{L^2 c_{\text{ж}i}^{j+1} - L^2 c_{\text{ж}i}^j + V c_{\text{п}i}^{j-1} - V c_{\text{п}i}^j}{m}, \quad c_{\text{ж}i}^j(0) = c_{\text{ж}i}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (3)$$

– в точке отбора MMA:

$$\frac{dc_{\text{ж}i}^j}{d\tau} = \frac{L^2 c_{\text{ж}i}^{j+1} - L^3 c_{\text{ж}i}^j + V c_{\text{п}i}^{j-1} - V c_{\text{п}i}^j - G_{\text{MMA}} c_{\text{ж}i}^j}{m}, \quad c_{\text{ж}i}^j(0) = c_{\text{ж}i}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (4)$$

– ниже точки отбора MMA:

$$\frac{dc_{\text{ж}i}^j}{d\tau} = \frac{L^3 c_{\text{ж}i}^{j+1} - L^3 c_{\text{ж}i}^j + V c_{\text{п}i}^{j-1} - V c_{\text{п}i}^j}{m}, \quad c_{\text{ж}i}^j(0) = c_{\text{ж}i}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (5)$$

$$L^1 = L, \quad L^2 = L^1 + G_F, \quad L^3 = L^2 - G_{\text{MMA}},$$

где  $c_{\text{ж}i}$  – концентрация веществ (1 – анилин, 2 – MMA, 3 – DMA) в жидкой фазе, кг/кг;  $c_{\text{п}i}$  – концентрация веществ в паровой фазе, кг/кг;  $L^1, L^2, L^3$  – расход жидкой фазы в разных зонах колонны, кг/с;  $V$  – расход паровой фазы, кг/с;  $G_F$  – расход катализата MMA на входе в колонну, кг/с;  $G_{\text{MMA}}$  – расход MMA из колонны, кг/с;  $m$  – масса жидкости в ячейке, кг;  $\tau$  – время, с.

Равновесные составы фаз для идеальных смесей по упрощенному соотношению, основанному на законе Рауля, записываются в виде

$$y_i^j = \varphi_i(T_j)x_i^j. \quad (6)$$

Для идеальных смесей зависимость  $\varphi_i$  имеет вид [11]

$$\varphi_i = a_i T_j + b_i. \quad (7)$$

Давление в колонне изменяется линейно по высоте и в точке с координатой  $j$  равно

$$P_j = P_{\text{H}} - \frac{(P_{\text{H}} - P_{\text{B}})j}{Z}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{B}}, P_{\text{H}}$  – давление внизу и вверху колонны соответственно;  $Z$  – высота колонны.

Учтем изменение давления по высоте колонны. Тогда равновесные концентрации компонентов найдем по формуле

$$y_i^j = \frac{a_i T_j + b_i}{P_j} x_i^j. \quad (9)$$

Полученные уравнения (1) – (9) описывают динамические режимы процессов разделения многокомпонентной смеси, протекающих в ректификационной колонне.

## Математическая модель куба колонны

Куб колонны представляет собой теплообменник с рубашкой, в котором происходит кипение и испарение смеси. Модель куба колонны состоит из уравнений общего, покомпонентного материального и энергетического балансов.

Уравнение общего материального баланса:

$$\frac{dM_k}{d\tau} = L - V ; \quad (10)$$

$$M_k = M_k^0 ,$$

где  $M_k$  – масса кубовой жидкости, кг;  $M_k^0$  – масса кубовой жидкости в начальный момент времени, кг.

Уравнения покомпонентного материального баланса:

$$\frac{d(M_k c_{jk1}^k)}{d\tau} = Lc_{jk1} - Vc_{np1}^k ; \quad (11)$$

$$\frac{d(M_k c_{jk2}^k)}{d\tau} = Lc_{jk2} - Vc_{np2}^k ; \quad (12)$$

$$\frac{d(M_k c_{jk3}^k)}{d\tau} = Lc_{jk3} - Vc_{np3}^k ; \quad (13)$$

$$c_{jk1}^k(0) = c_{jk1}^{k0} ; \quad c_{jk2}^k(0) = c_{jk2}^{k0} ; \quad c_{jk3}^k(0) = c_{jk3}^{k0} ,$$

где  $c_{jk1}^k$ ,  $c_{jk2}^k$ ,  $c_{jk3}^k$  – концентрации анилина, ММА и ДМА в кубовой жидкости соответственно, кг/кг;  $c_{jk1}^{k0}$ ,  $c_{jk2}^{k0}$ ,  $c_{jk3}^{k0}$  – концентрации анилина, ММА и ДМА в кубовой жидкости в начальный момент времени соответственно, кг/кг;  $c_{np1}^k$ ,  $c_{np2}^k$ ,  $c_{np3}^k$  – концентрации анилина, ММА и ДМА в парах куба соответственно, кг/кг.

Концентрации компонентов в паровой фазе равны равновесным концентрациям:

$$c_{np1}^k = c_{np1}^{k*} ; \quad c_{np2}^k = c_{np2}^{k*} ; \quad c_{np3}^k = c_{np3}^{k*} .$$

Уравнение энергетического баланса:

$$\frac{d(M_k i_k)}{d\tau} = L i_{jk} - V i_k + Q_k - V r_k ; \quad (14)$$

$$i_k = i_k^0 ,$$

где  $Q_k$  – тепловой поток на нагрев кубовой жидкости, Дж/с;  $i_k$  – удельная энталпия кубовой смеси, Дж/кг;  $r_k$  – удельная теплота парообразования испарившейся смеси, Дж/кг.

Уравнение материального баланса по пару в рубашке

$$\frac{dm_{np}^{06}}{d\tau} = g_{np}^{06} - g_k^{06} . \quad (15)$$

Так как масса конденсата, накапливающаяся в рубашке, практически равна нулю, то можно считать

$$g_{\text{п}}^{\text{об}} - g_{\text{k}}^{\text{об}} = 0, \quad (16)$$

где  $m_{\text{п}}^{\text{об}}$  – масса пара в рубашке, кг;  $g_{\text{п}}^{\text{об}}$ ,  $g_{\text{k}}^{\text{об}}$  – расходы пара и конденсата соответственно, кг/с.

Уравнение энергетического баланса для рубашки куба

$$\frac{d(m_{\text{п}}^{\text{об}} i_{\text{п}}^{\text{об}})}{d\tau} = -k^{\text{k}} F^{\text{k}} (t_{\text{п}}^{\text{k}} - t_{\text{k}}) + g_{\text{п}}^{\text{об}} i_{\text{п}}^{\text{об}} - g_{\text{k}}^{\text{об}} i_{\text{k}}^{\text{об}}, \quad (17)$$

где  $i_{\text{п}}^{\text{об}}$  – удельная внутренняя энергия пара в рубашке куба, Дж/кг;  $i_{\text{п}}^{\text{об}}$ ,  $i_{\text{k}}^{\text{об}}$  – энтальпии греющего пара и конденсата соответственно, Дж/кг;  $F^{\text{k}}$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $k^{\text{k}}$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{\text{п}}^{\text{k}}$ ,  $t_{\text{k}}$  – температуры пара в рубашке куба и нагреваемой жидкости соответственно, °С.

Расход греющего пара определим

$$g_{\text{п}}^{\text{об}} = \varphi(p_{\text{п}}, p_{\text{п}}^{\text{k}}, \mu^{\text{k}}), \quad (18)$$

где  $p_{\text{п}}$  – давление в паропроводе, кПа;  $p_{\text{п}}^{\text{k}}$  – давление в рубашке куба кПа;  $\mu^{\text{k}}$  – пропускная способность клапана.

Энтальпия греющего пара

$$i_{\text{п}}^{\text{об}} = f_1(P_{\text{пар}}), \quad (19)$$

где  $P_{\text{пар}}$  – давление греющего пара, кПа.

Полученные уравнения (10) – (19) представляют математическую модель процессов, происходящих в кубе колонны.

### Математическая модель дефлегматора колонны

В дефлегматоре колонны, представляющем собой кожухотрубчатый двухходовой теплообменник, происходит конденсация и охлаждение дистиллята. Модель дефлегматора состоит из уравнений общего, покомпонентного материального и энергетического балансов.

Уравнение общего материального баланса:

$$\frac{dM_{\text{д}}}{d\tau} = V - L - D; \quad (20)$$

$$M_{\text{д}} = M_{\text{д}}^0,$$

где  $M_{\text{д}}$  – масса жидкости в дефлегматоре, кг;  $M_{\text{д}}^0$  – масса жидкости в дефлегматоре в начальный момент времени, кг;  $D$  – расход дистиллята, кг/с.

Уравнения покомпонентного материального баланса:

$$\frac{d(M_{\text{д}} c_{\text{ж1}}^{\text{д}})}{d\tau} = V c_{\text{n1}} - L c_{\text{ж1}}^{\text{д}} - D c_{\text{ж1}}^{\text{д}}; \quad (21)$$

$$\frac{d(M_{\text{д}}c_{\text{ж}2}^{\text{д}})}{d\tau} = Vc_{\text{п}2} - Lc_{\text{ж}2}^{\text{д}} - Dc_{\text{ж}2}^{\text{д}} ; \quad (22)$$

$$\frac{d(M_{\text{д}}c_{\text{ж}3}^{\text{д}})}{d\tau} = Vc_{\text{п}3} - Lc_{\text{ж}3}^{\text{д}} - Dc_{\text{ж}3}^{\text{д}} ; \quad (23)$$

$$c_{\text{ж}1}^{\text{д}}(0) = c_{\text{ж}1}^{\text{д}0} ; \quad c_{\text{ж}2}^{\text{д}}(0) = c_{\text{ж}2}^{\text{д}0} ; \quad c_{\text{ж}3}^{\text{д}}(0) = c_{\text{ж}3}^{\text{д}0} ,$$

где  $c_{\text{ж}1}^{\text{д}}$ ,  $c_{\text{ж}2}^{\text{д}}$ ,  $c_{\text{ж}3}^{\text{д}}$  – концентрация анилина, ММА, ДМА во флегме соответственно, кг/кг;  $c_{\text{ж}1}^{\text{д}0}$ ,  $c_{\text{ж}2}^{\text{д}0}$ ,  $c_{\text{ж}3}^{\text{д}0}$  – концентрация анилина, ММА, ДМА во флегме в начальный момент времени соответственно, кг/кг.

Уравнение энергетического баланса:

$$\begin{aligned} \frac{d(M_{\text{д}}i_{\text{д}})}{d\tau} &= Vi_{\text{п}} - Li_{\text{д}} - Di_{\text{д}} - Q_{\text{д}} ; \\ i_{\text{д}}(0) &= i_{\text{д}}^0 , \end{aligned} \quad (24)$$

где  $i_{\text{д}}$  – энталпия жидкости в дефлегматоре, Дж/кг;  $r$  – удельная теплота парообразования испарившейся смеси, Дж/кг;  $Q_{\text{д}}$  – тепловой поток, отводимый при конденсации паров в дефлегматоре, Дж/с, определяемый по формуле

$$Q_{\text{д}} = g_{\text{в}}^{\text{ox}} \left( i_{\text{в}}^{\text{вх}} - i_{\text{в}}^{\text{вых}} \right) , \quad (25)$$

где  $i_{\text{в}}^{\text{вх}}$ ,  $i_{\text{в}}^{\text{вых}}$  – энталпии охлаждающей воды соответственно на входе и выходе из дефлегматора, Дж/кг.

Полученные уравнения (20) – (25) представляют математическую модель процессов, происходящих в дефлегматоре колонны.

### Заключение

Разработанная модель процесса ректификации ММА пригодна для исследования процесса очистки ММА в ректификационной колонне. Алгоритм управления, построенный на основе нейросетевой системы регулирования с использованием разработанной модели, позволяет управлять процессом ректификации при разных значениях возмущающих воздействий, в частности при изменении состава и расхода поступающей на разделение смеси.

### Список литературы

1. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака / В. С. Кудряшов, С. Г. Тихомиров, С. В. Рязанцев, А. В. Иванов, И. А. Козенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 572 – 580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580
2. Коновалов, В. И. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 796 – 811.

3. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062
4. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 3(55). – С. 55 – 62.
5. Бракоренко, А. С. Моделирование технологических процессов в ходе разработки и отладки АСУ ТП / А. С. Бракоренко // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 21 – 27.
5. Двухмодельный комплекс для исследования процесса адсорбции водорода / Б. С. Дмитриевский, М. Х. Х. Альруйшид, А. А. Терехова [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 528 – 535. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp. 528-535
7. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом адсорбционного получения водорода / М. Х. Х. Альруйшид, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 35 – 45. doi: 12.17277/vestnik.2022.01.pp.035-045
8. Анисимов, И. В. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок / И. В. Анисимов, В. И. Бодров, В. Б. Покровский. – Москва : Химия, 1975. – 216 с.
9. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Н. В. Ушева, О. Е. Мойзес, О. Е. Митянина, Е. А. Кузьменко. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
10. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А. В. Кравцов, Э. Д. Иванчина, Е. Н. Ивашкина [и др.] // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41 – 46.
11. Грачев, Ю. П. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов / Ю. П. Грачев, А. К. Тубольцев, В. К. Тубольцев. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 216 с.
12. Sharma, K. L. S. Overview of industrial process automation / K. L. S. Sharma. – Amsterdam : Elsevier Science, 2011. – 320 р.
13. Рылов, М. А. Обзор систем усовершенствованного управления технологическими процессами / М. А. Рылов // Исследовано в России (электронный научный журнал). – 2013. – № 8. – С. 120 – 126.
14. Степанец, А. В. Регулирующий адаптивный комплекс на основе каскадной системы с моделью объекта управления / А. В. Степанец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/10(56). – С. 14 – 18.
15. Redutskiy, Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry / Yu. Redutskiy // Procedia. Computer Science. – 2017. – Vol. 109. – P. 745 – 753.
16. Галяув, Е. Р. Робастное оптимальное управление линейными объектами с эталонной моделью / Е. Р. Галяув, И. Б. Фуртат // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 22 – 25.
17. Кудряшов, В. С. Способ автоматизированного синтеза структуры передаточных функций автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В. С. Кудряшов // Вестн. Воронеж. гос. технол. акад. Серия : Информационные технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 16 – 20.
18. Назаров, В. Н. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом очистки монометиланилина в ректификационной колонне : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Назаров Виктор Николаевич. – Тамбов, 2010. – 115 с.

## **Mathematical Model of Purification of Monomethylaniline in a Distillation Column**

**D. Yu. Muromtsev<sup>1</sup>, V. N. Nazarov<sup>2</sup>✉,  
B. S. Dmitrievsky<sup>2</sup>, R. V. Voronkov<sup>2</sup>, D. G. Dmitriev<sup>2</sup>**

*Departments: Radioelectronic and Microprocessor Systems Design (1);*

*Information Processes and Control (2), ipu\_tstu@mail.ru;*

*TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** mathematical model; material balance; monomethylaniline; packed column; neural networks; rectification process; control system; energy balance.

**Abstract:** The article presents a mathematical model of rectification of monomethylaniline in a batch nozzle. The physico-chemical and thermodynamic patterns of the rectification process were used in the formation of the mathematical model. A mathematical model of the column, cube and deflector itself is presented. The mathematical model is constructed for use in a control system for the technological process of monomethylaniline purification based on digital automation tools using neural networks to regulate concentrations of water, aniline, and monomethylaniline under disturbances in the form of changes in the composition of the mixture undergoing separation.

### *References*

1. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Method of modeling a multivariate digital control system for the ammonia synthesis process], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Konovalov V.I., Gatapova N.C. [The main ways of energy saving and optimization in heat and mass transfer processes and equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 796-811. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Saif M.N.M., Matveikin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiconnected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Demidenko N.D., Kulagina L.V. [Modeling and optimization of technological systems with distributed parameters], *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibGAU], 2014, no. 3(55), pp. 55-62. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Brakorenko A.S. [Modeling of Technological Processes during the Development and Debugging of APSCS], *Elektrotekhnicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya*. [Electrical Engineering Complexes and Control Systems], 2014, no. 3, pp. 21-27. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Dmitrievsky B.S., Alruyshid M.H.H., Terekhova A.A. [et al.], [A two-model complex for studying the process of hydrogen adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 528-535. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.528-535 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Alruyshid M.H.H., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A. [et al.], [Mathematical modeling and optimal control of the process of adsorption production of hydrogen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 35-45. doi: 12.17277/vestnik.2022.01.pp.035-045 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Anisimov I.V., Bodrov V.I., Pokrovskiy V.B. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya rektifikatsionnykh ustavovok* [Mathematical modeling and optimization of distillation units], Moscow: Chemistry, 1975, 216 p. (In Russ.)
9. Usheva N.V., Moises O.E., Mityanina O.E., Kuzmenko E.A. *Matematicheskoye modelirovaniye khimiko-tehnologicheskikh protsessov* [Mathematical Modeling of Chemical-Engineering Processes], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, 135 p. (In Russ.)
10. Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N. [et al.], [Mathematical Modeling of Catalytic Processes of Hydrocarbon Feedstock Processing], *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2008, no. 6, pp. 41-46 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Grachev Yu.P., Tuboltsev A.K., Tuboltsev V.K. *Modelirovaniye i optimizatsiya teplo- i massoobmennykh protessov* [Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes], Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1984, 216 p. (In Russ.)
12. Sharma K.L.S. *Overview of industrial process automation*, Amsterdam: Elsevier Science, 2011, 320 p.
13. Rylov M.A. [Review of advanced control systems for technological processes], *Issledovano v Rossii (elektronnyy nauch-nyy zhurnal)* [Researched in Russia (electronic scientific journal)], 2013, no. 8, pp. 120-126 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Stepanets A.V. [Adaptive control complex based on a cascade system with a control object model], *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East European Journal of Advanced Technologies], 2012, no. 2/10(56), pp.14-18. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Redutskiy Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry, *Procedia. Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 745-753.
16. Galyauv E.R., Furtat I.B. [Robust optimal control of linear objects with a reference model], *Pribory i sistemy. Upravlyeniye, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2010. no. 2, pp. 22-25. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Kudryashov V.S. [Method of automated synthesis of the structure of transfer functions of autonomous compensators of a multiconnected digital control system], *Vestnik Voronezhskoy gosudarstvennoy tekhnologicheskoy akademii Seriya Informatsionnyye tekhnologii, modelirovaniye i upravleniye* [Bulletin of the Voronezh State Technological Academy Series Information Technology, Modeling and Control], 2011, no. 2, pp. 16-20. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Nazarov V.N. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Tambov, 2010, 115 p. (In Russ.)

## **Mathematisches Modell der Monomethylanilinreinigung in einer Destillationskolonne**

**Zusammenfassung:** Es ist ein mathematisches Modell für die Destillation von Monomethylanilin (MMA) in einer kontinuierlichen Füllkörperkolonne vorgestellt. Physikalisch-chemische und thermodynamische Prinzipien des Destillationsprozesses sind bei der Entwicklung des Modells berücksichtigt. Das Modell beschreibt die Prozesse in Kolonne, Destillierapparat und Dephlegmator. Es dient als Grundlage für ein Prozessleitsystem zur MMA-Reinigung, das auf digitalen Automatisierungswerkzeugen und neuronalen Netzen basiert. Dieses System regelt die Konzentrationen von Wasser, Anilin und MMA unter Störungen wie z. B. Änderungen der Zusammensetzung des Eingangsgemisches.

## **Modèle mathématique de purification de la monométhylaniline dans la colonne de rectification**

**Résumé:** Est présenté un modèle mathématique de rectification de la mono-méthylaniline (MRM) dans une colonne de buse continue. Lors de la formation d'un modèle mathématique, les modèles physico-chimiques et thermodynamiques du processus de rectification sont utilisés. Est présenté un modèle mathématique des processus dans une colonne, un cube et un déflegmateur. Le modèle mathématique est construit pour le système de contrôle du processus de nettoyage MRM à la base de moyens d'automatisation numériques utilisant des systèmes neuronaux pour réguler les concentrations d'eau, d'aniline et de MRM en cas de perturbations sous la forme de changements dans la composition du mélange entrant dans la séparation.

---

**Авторы:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научной работе; *Назаров Виктор Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Воронков Роман Вячеславович* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дмитриев Дмитрий Геннадьевич* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.